

ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.45

***В.А. Усольцев^{1,2}, Ю.В. Норицина¹, Д.В. Норицин², В.П. Часовских²,
А.К. Габделхаков³, А.С. Касаткин⁴, А.С. Жанабаева⁴***

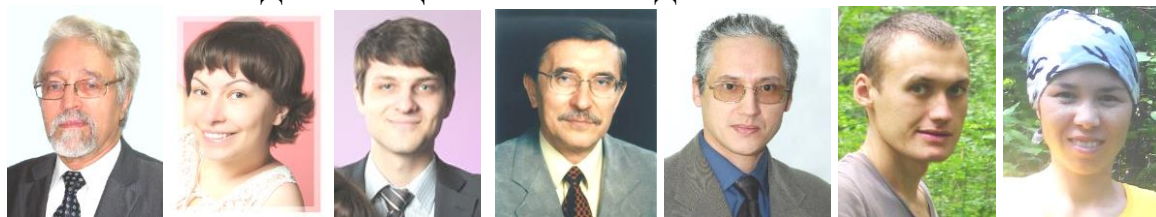
¹ Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург,

² Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург,

³ Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа

⁴ Департамент лесного хозяйства Приморского края, г. Владивосток

**АЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ЛИСТВЕННЫХ
ПОРОД ЕВРАЗИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЛЕСОВ**



На климатическом саммите ООН в Париже в декабре 2015 г. 196 стран приняли на себя обязательства сократить выбросы углекислого газа и не допустить повышения среднегодовой температуры более чем на 2 градуса к концу века. Лесным экосистемам, как поглотителям атмосферного углерода, отводится в названной перспективе важная роль. В настоящее время в мире активно совершенствуются технологии оценки углерододепонирующей функции лесного покрова, и разработано множество её эмпирических и имитационных моделей с сопряжённым использованием данных наземной инвентаризации лесов и методов дистанционного зондирования (Päivinen et al., 2001; Zheng et al., 2007; Лежнин и др., 2010; Dalponte et al., 2015; Sheridan et al., 2015).

В связи с глобализацией оценок биологической продуктивности лесного покрова сегодня происходит смещение ее акцентов, а именно: от наземных методов – в пользу дистанционных. Лазерное зондирование (локация) лесного полога сегодня является составной частью новейших методов и технологий геоинформатики и цифровой фотограмметрии и по многим показателям превосходит не только другие дистанционные методы изучения и измерения параметров лесного полога (Данилин, 2003; Lim, Treitz, 2004; Maltamo et al., 2004; Stone et al., 2012), но и методы наземной таксации (Næsset, 2002; Næsset et al., 2004). В 1994 году было инициировано создание мировой базы данных о количественных параметрах и структуре крон деревьев и лесного полога в целом (Canopy Research Network) для целей 3-D моделирования структуры лесного полога (Nadkarni, Parker, 1994). Регулируя сомкнутость полога, можно влиять на темпы лесовозобновления в условиях изменения климата (Dobrowski et al., 2015).

В последние годы появился принципиально новый лазерно-локационный метод съёмки лесного полога, позволяющий обрабатывать огромные массивы данных (сотни гигабайт) лазерного зондирования в режиме реального времени, практически одновременно с выполнением измерений, причём не только обезличенного лесного покрова, но и отдельных деревьев (Данилин, 2003; Данилин и др., 2005; Усольцев, 2014).

Поскольку деревья разных древесных пород обладают специфичной конфигурацией вертикального профиля, эта специфика сегодня распознается с помощью лазерных локаторов (лидаров), размещаемых на бортовых носителях. При множественной регистрации лидаром отраженных лазерных импульсов по характеру группировки точек профиля (point clouds) и его очертанию можно с точностью 95% различать сосну,

ель и мелколиственные породы (рис. 1). Сосна отличается от мелколиственной березы характерными сгущениями точек, а ель от прочих – формой кроны (Holmgren, Persson, 2004; Næsset et al., 2004; Brandtberg et al., 2007). Ещё в 1960-70 годы методы аэрофото-съемки позволяли определять такие параметры деревьев, как высота, диаметр кроны и площадь ее проекции с большей точностью, чем при наземных работах (Weaver, 1977; Сеницын, Сухих, 1979).

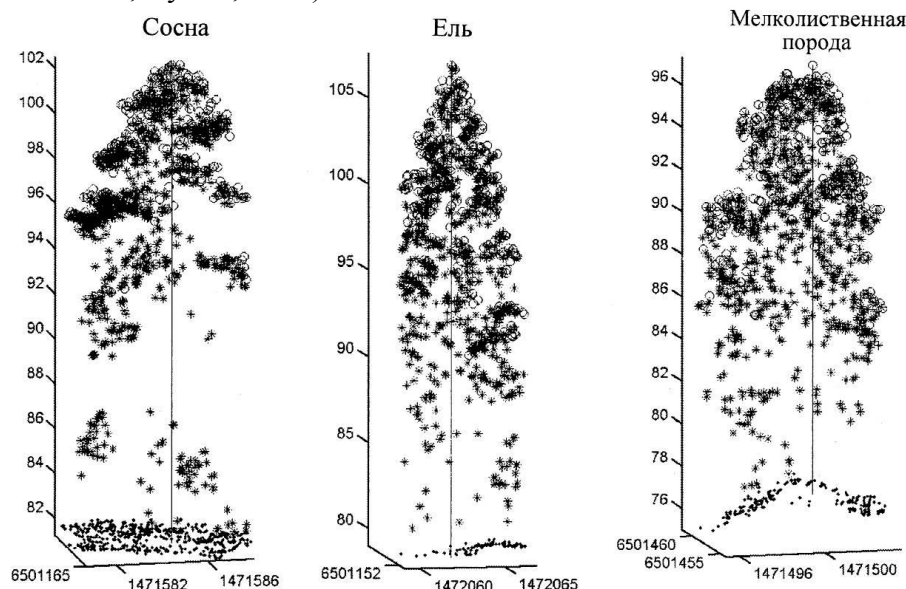


Рис. 1. Множественная регистрация бортовым носителем отраженных лазерных импульсов (laser points) формирует вертикальный профиль деревьев на примере трех древесных пород (Næsset et al., 2004).

Ещё в конце XIX века Р. Гартигом на примере 52-летних елей было показано, что с изменением диаметра кроны в диапазоне от 1,5 до 3,0 м масса охвоённых побегов увеличивается с 15 до 119 кг (Hartig, 1896). Аналогичная закономерность позднее была показана А. Денглером на примере сосны обыкновенной в возрасте 150-160 лет: с изменением площади проекции кроны в диапазоне от 10 до 71 м² масса хвои дерева увеличивается от 8,0 до 51,4 кг (Dengler, 1937). Уже первые попытки корреляционного анализа массы хвои ели и пихты разного возраста и площади проекции кроны дерева показали наличие тесной связи названных показателей, при этом коэффициент корреляции варьировал от 0,91 до 0,97 (Kern, 1962). Проанализировав на примере 26 деревьев кипарисовика туполистного в возрасте от 9 до 76 лет связь массы листвы в свежем состоянии от различных параметров кроны, М. Каджихара (Kajihara, 1981) установил, что эта связь с площадью проекции кроны менее тесная, чем с объемом мантии кроны (её облиственной части) ($0,849 < 0,906$). Аналогичный вывод им получен для криптометии японской (Kajihara, 1980). Предпринимались также попытки связать массу кроны с её объемом (Burger, 1939; Kern, 1962; Westman, Whittaker, 1975), но из-за трудоёмкости и недостаточной точности определения последней, они не получили развития.

В открытых лесных сообществах пустынной зоны Средней Азии, представленных саксаульниками (род *Haloxylon* Bunge), было установлено, что диаметр кроны обладает диагностической функцией, присущей диаметру ствола на высоте груди в лесной зоне, что дало возможность разработать регрессионные модели для оценки их фитомассы по высоте и диаметру кроны, используемые как при наземной таксации, так и при аэрофото-съемке (Вейисов, Каплин, 1976; Усольцев, 1988). До последнего времени подобный подход к оценке фитомассы деревьев лесной зоны не применялся вследствие высокой горизонтальной и вертикальной сомкнутости полога. Однако современный лазерно-локационный метод позволяет регистрировать не только видимые, но и «спрятанные» под верхним пологом деревья (рис. 2). Изложенные преимущества дистанционной локации многократно усиливаются благодаря той скорости обработки данных, которую обеспечивает упомянутый лазерно-локационный метод.



Рис. 2. Схема множественного отражения лазерного импульса от лесного полога высотой 18 м (Nelson et al., 1988).

В последних зарубежных публикациях возможности лазерного зондирования деревьев с целью оценки их фитомассы рассматриваются в связи с традиционными методами наземной таксации. Для этого предлагается 3-ступенчатая процедура: (1) лазерно-локационным методом регистрируются высоты и диаметры крон деревьев на некоторой площади, (2) по имеющимся базам данных о фитомассе деревьев рассчитываются аллометрические зависимости диаметра на высоте груди (D) от высоты (H) и диаметра кроны (D_{cr}) дерева и (3) рассчитываются аллометрические уравнения зависимости фитомассы дерева (P_i): от D и H и от D_{cr} и H с последующим расчетом фитомассы на единице площади по традиционным аллометрическим моделям и моделям для лазерной локации деревьев (Popescu, 2007; Jucker et al., 2016).

Цель настоящего исследования – разработать аллометрические модели для оценки фракционной структуры фитомассы деревьев лиственных древесных и кустарниковых пород Евразии для целей лазерной оценки фитомассы лесов и депонирования атмосферного углерода и сравнить их с традиционными аллометрическими моделями.

Объекты и методы исследования

У исследователей биологической продуктивности мировых лесов имеются в наличии фактические данные о фитомассе, по-видимому, сотен тысяч деревьев разных пород, которые обычно ими не публикуются и поэтому недоступны для анализа структуры их фитомассы. Только по одной древесной породе, лиственнице Гмелина, в северо-восточном Китае у исследователей имеется 1050 нигде не опубликованных определений фитомассы деревьев на 355 пробных площадях (Liu et al., 1994). Даже крупнейший исследователь фитомассы лесов России Анатолий Иванович Уткин (1929-2006), в преддверии исследований по Международной Биологической Программе специально обратившийся к коллегам с призывом публиковать имеющиеся данные о фитомассе лесных фитоценозов (Уткин, 1967), тем не менее, сам в своих многочисленных изданиях не опубликовал практически ничего из полученных им и его учениками фактических данных о структуре фитомассы деревьев. Не было ничего опубликовано из имевшихся фактических данных о фитомассе деревьев также представителями научной школы профессора Льва Константиновича Позднякова (1912-1990) в Красноярске.

Тем не менее, для осуществления поставленной цели по имеющимся литературным источникам нами была сформирована база данных о структуре фитомассы модельных деревьев, взятых исследователями на пробных площадях при оценке биологической продуктивности лиственных древесных и кустарниковых пород в количестве 1,34 тыс. определений (табл. 1). Она сопряжена с основными морфометрическими показателями деревьев и охватывает территорию Евразии от Великобритании до Китая и Японии. Около 85 % данных взято из русскоязычной литературы бывшего СССР.

Основные таксационные показатели, определяющие фитомассу дерева и включенные в сформированную базу данных, – это возраст, диаметр ствола и высота дерева,

длина и диаметр кроны, а также густота древостоя, в котором определена фитомасса деревьев. Кроме того, показаны объемы стволов и приведены координаты пробных площадей, необходимые при географическом анализе подеревных данных фитомассы.

Сегодня для основных древесных пород Северной Америки, Европы и Японии имеется соответственно около 2600, 800 и 1000 аллометрических уравнений для оценки фитомассы, в основном, по высоте дерева и диаметру ствола на высоте груди (Jenkins et al., 2004; Muukkonen, Mäkipää, 2006; Hosoda, Ichara, 2010). Все они предназначены лишь для наземной таксации.

Таблица 1

Распределение количества модельных деревьев лиственных пород с определениями фитомассы (кг) по древесным и кустарниковым видам (родам) и странам

Род (вид)	Систематическое название	Страна	Количество модельных деревьев*
Берёза	Род <i>Betula</i> L.	Россия, Казахстан, Япония, Монголия, Китай, Великобритания, Франция, Бельгия, Финляндия, Азербайджан	1277/1215/170
Осина и тополи	Род <i>Populus</i> L.	Россия, Казахстан, Монголия	513 / 512 / 39
Липа	Род <i>Tilia</i> L.	Россия, Чехия, Болгария	402 / 399 / 138
Ольха	Род <i>Alnus</i> Mill.	Россия	24 / 24 / 16
Дуб	Род <i>Quercus</i> L.	Россия, Болгария, Япония, Чехия, Швейцария, Венгрия	130 / 43 / 18
Бук	Род <i>Fagus</i> L.	Франция, Германия, Чехия, Италия, Швеция, Дания	56 / - / 33
Ясень	Род <i>Fraxinus</i> L.	Россия, Чехия, Китай	31 / 24 / 13
Граб	Род <i>Carpinus</i> Decne	Болгария	15 / - / -
Робиния псевдо-акация	Вид <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Словакия, Болгария	24 / - / 18
Ива	Род <i>Salix</i> L.	Россия, Швеция	23 / 22 / 10
Клён	Род <i>Acer</i> L.	Россия, Болгария	27 / 26 / 14
Ильм, вяз	Род <i>Ulmus</i> L.	Россия	9 / 9 / 7
Чозения	Род <i>Chosenia</i> Nakai	Россия	17 / 17 / 8
Лещина	Род <i>Corylus</i> L.	Россия, Украина	9 / 9 / -
Рябина	Род <i>Sorbus</i> L.	Россия	20 / 20 / -
Боярышник	Род <i>Crataegus</i> L.	Россия	8 / 8 / 6
Черёмуха обыкновенная	Вид <i>Prunus padus</i> L.	Россия	8 / 8 / 6
Орех маньчжурский	Вид <i>Juglans mandshurica</i> Maxim.	Россия	7 / 7 / 7
Маакия амурская	Вид <i>Maackia amurensis</i> Rupr.	Россия	7 / 7 / 7
Бархат амурский	Вид <i>Phellodendron amurense</i> Rupr.	Россия	7 / 7 / 7
Итого			1337/ 1142/ 347

* Первая цифра – общее количество, вторая – количество определений, взятых из русскоязычной литературы бывшего СССР и третья – количество определений с измеренным диаметром кроны.

Использование высоты и диаметра ствола при оценке массы дерева восходит к началам лесной таксации. По этим двум входам составлялись и составляются поныне объемные и сортиментные таблицы для стволов деревьев (Крюденер, 1908; Орлов,

1928; Тюрин и др., 1945; Третьяков и др., 1952). Позднее с ними стали совмещать и таблицы фитомассы деревьев (Токмурзин, Байзаков, 1970; Кричун и др., 1978), а также разрабатывать специальные регрессионные модели и таблицы для оценки фракционной структуры фитомассы деревьев разных древесных пород, ориентированные на их наземную таксацию (Усольцев, Усольцева, 1977; Алексеев, Уткин, 1982; Усольцев, 1985; Усольцев и др., 2015).

Одна из первых попыток сравнить объяснительную способность аллометрических уравнений, описывающих зависимость фитомассы пяти кустарниковых сообществ высотой от 2 до 4 м (*Alnus crispa*, *Corylus cornuta*, *Acer spicatum*, *Amelanchier* spp. и *Salix* spp.) от высоты, диаметра на высоте 15 см от корневой шейки и площади проекции кроны (попарно), принадлежит американским исследователям (Ohmann et al., 1976). Ими рассчитана серия уравнений:

$$\ln Pf = a + b \ln Scr, \quad (1)$$

$$\ln Pf = a + b \ln H, \quad (2)$$

$$\ln Pf = a + b \ln D_{15}, \quad (3)$$

$$\ln Pst = a + b \ln Scr, \quad (4)$$

$$\ln Pst = a + b \ln H, \quad (5)$$

$$\ln Pst = a + b \ln D_{15}, \quad (6)$$

где Pf и Pst фитомасса соответственно листьев и стволов, кг; H – высота растения, м; Scr – площадь горизонтальной проекции кроны, м²; D_{15} – диаметр ствола на расстоянии 15 см от шейки корня, см. Среднее значение коэффициента детерминации (R^2) уравнений (1) при оценке массы листьев по площади проекции кроны Scr составило 0,69, т.е. выше, чем при её оценке по высоте H ($R^2 = 0,54$) и по диаметру ствола D_{15} ($R^2 = 0,61$). При оценке массы ствола по площади проекции кроны R^2 уравнения (4) составил 0,56, т.е. выше, чем при её оценке по высоте растения (0,54), но ниже, чем при оценке по диаметру ствола (0,76).

Нами выполнен сравнительный статистический анализ объяснительной способности названных аллометрических уравнений при оценке фитомассы кустарников по каждому из трёх морфометрических показателей. Он показал (табл. 2), что различия трёх видов названных уравнений по описанию изменчивости фитомассы кустарников статистически не значимы, т.е. оценка фитомассы как листьев, так и стволов, по уравнениям (1) и (4) может быть выполнена с такой же точностью, как и по уравнениям соответственно (2)-(3) и (5)-(6).

Таблица 2

Средние значения R^2 , характеризующие уравнения (1)-(6) (Ohmann et al., 1976. Table 4) для фракций фитомассы листьев и стволов пяти североамериканских кустарников, и значимость их различия по соответствующим парам уравнений

Фракция фитомассы	Уравнение	M	$\pm m$	Значимость различия по Стьюденту		n	Наличие или отсутствие различия
				$t_{\text{факт}}$	$t_{\text{табл}}$		
Pf	(1)	0,676	0,0483	2,10	9,0	5	Нет
	(2)	0,536	0,0450				
	(1)	0,676	0,0483	1,05	9,0	5	Нет
	(3)	0,598	0,0565				
Pst	(4)	0,556	0,1303	0,04	9,0	5	Нет
	(5)	0,550	0,0592				
	(4)	0,556	0,1303	1,08	9,0	5	Нет
	(6)	0,764	0,1414				

Примечания. Здесь и далее: M – среднее значение показателя; m – ошибка среднего значения; $t_{\text{факт}}$ и $t_{\text{табл}}$ – критерии Стьюдента, соответственно фактическое и табличное значения; n – число уравнений.

Сформированная нами база данных дала возможность разработать для каждого древесного и кустарникового вида трансконтинентальные аллометрические 2-факторные модели фракционной структуры фитомассы, включающие в качестве регрессоров диаметр кроны и высоту дерева:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{cr}, \quad (7)$$

и сопоставить их объяснительную способность с традиционной аллометрической моделью

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln DBH, \quad (8)$$

где P_i – фитомасса в абсолютно сухом состоянии стволов с корой, скелета ветвей, хвои (лишвы), надземной части и корней (соответственно Pst , Pbr , Pf , Pa и Pr), кг; H – высота дерева, м; D_{cr} – диаметр кроны, м; DBH – диаметр ствола на высоте груди, см.

К сожалению, при обработке модельных деревьев на пробных площадях исследователи обычно учитывали их возраст, высоту и диаметр ствола на высоте груди, поскольку при наземной таксации их совокупность объясняла 90-99 % изменчивости той или иной фракции фитомассы (Усольцев, 1983). Иногда измерялась также длина кроны, но редко – ее диаметр. Считалось, что последний морфометрический показатель не вносит существенного вклада в объяснение изменчивости фитомассы дерева, обеспечиваемое выше названными показателями. К тому же, вследствие неправильной формы проекции кроны, точность измерения её диаметра была сомнительной, во всяком случае, гораздо более низкой, чем точность измерения диаметра ствола. Вследствие того, что не все фактические данные фитомассы деревьев включали измеренные значения диаметра кроны, при расчете моделей (7) мы были вынуждены использовать лишь часть сформированной базы данных, а именно – только те деревья, которые имели измеренный диаметр кроны. Их доля в общем объеме данных составила 26 % (см. **табл. 1**). Для обеспечения сопоставимости объяснительной способности моделей (7) и (8) расчет модели (8) выполнен по тому же объему исходных данных, что и модель (7).

Результаты и их обсуждение

Результаты последовательного расчета констант уравнений (7) и (8) сведены в **табл. 3**. Густота древостоя при оценке фитомассы дерева по уравнению (7) в большинстве случаев была статистически не значима вследствие ее корреляции с диаметром кроны. Результаты анализа показателей R^2 и SE , характеризующих уравнения (7) и (8) для всех фракций фитомассы P_i , и оценка значимости их различия по названным уравнениям представлены в **табл. 4**.

Результаты сравнительного анализа показали, что обе модели в большинстве случаев объясняют изменчивость фракционной структуры фитомассы более, чем на 90% (см. **табл. 3**). Объяснительная способность уравнений (7) по отношению к (8) для лишвы и ветвей ниже соответственно на 3 и 4%, однако это различие статистически не значимо: $t_{\text{факт}}$ составил соответственно 0,7 и 1,0, что ниже стандартных значений. Ошибка уравнений SE для упомянутых фракций соответственно выше, но и это различие, в основном, статистически не значимо.

Объяснительная способность уравнений (7) по отношению к (8) для массы ствола и надземной также ниже в среднем на 4 %, но это различие статистически значимо: $t_{\text{факт}}$ составил соответственно 5,0 и 4,4, что выше стандартных значений. Впрочем, подобное сопоставление с точки зрения математической корректности можно было выполнить лишь при условии нормальности распределений как R^2 , так и SE , что в данном случае не сделано, к тому же для этого нужен критерий Фишера, но не Стьюдента (устное замечание Г.Б. Кофмана).

Таблица 3

Характеристика уравнений (7) и (8)

Род (вид)	Фракция фитомассы	Константы уравнения (7)			Константы уравнения (8)			R^2 для уравнений		SE для уравнений*	
		a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2	(7)	(8)	(7)	(8)
Берёза	<i>Pst</i>	-4,8045	2,9127	0,6253	-3,4725	1,1568	1,6545	0,955	0,986	0,41	0,23
	<i>Pbr</i>	-5,7668	2,2617	1,2545	-4,1172	-0,2623	2,6566	0,876	0,938	0,73	0,51
	<i>Pf</i>	-4,9498	1,5025	1,1359	-3,7883	-0,3629	2,0858	0,851	0,902	0,61	0,49
	<i>Pa</i>	-4,4832	2,7961	0,7577	-3,0891	0,8755	1,8703	0,943	0,980	0,47	0,27
	<i>Pr</i>	-3,7279	2,3956	0,2353	-3,3319	0,3981	2,0299	0,821	0,984	0,67	0,15
Осина и тополи**	<i>Pst</i>	-4,0075	2,0536	1,6066	-3,7752	1,0645	1,7992	0,938	0,991	0,30	0,12
	<i>Pbr</i>	-3,7558	0,4156	3,1638	-2,9323	-1,6573	3,5480	0,846	0,943	0,60	0,37
	<i>Pf</i>	-3,9394	0,2241	2,6885	-3,2324	-1,6842	3,1602	0,791	0,967	0,60	0,24
	<i>Pa</i>	-3,5324	1,8460	1,7906	-3,1864	0,7054	2,0151	0,926	0,988	0,34	0,14
	<i>Pst</i>	-4,8754	3,1643	0,3170	-4,2273	1,2493	1,7973	0,890	0,989	0,44	0,14
Липа**	<i>Pbr</i>	-3,7502	1,9167	0,6814	-3,0828	-0,8215	2,7557	0,660	0,885	0,72	0,42
	<i>Pf</i>	-4,3079	1,4374	0,6879	-4,1730	-0,3150	1,9702	0,600	0,683	0,69	0,62
	<i>Pa</i>	-4,0476	2,9120	0,3724	-3,4196	0,9134	1,9099	0,867	0,983	0,46	0,16
	<i>Pst</i>	-5,2688	2,5164	1,3219	-3,6405	0,7795	1,9666	0,963	0,996	0,24	0,07
	<i>Pbr</i>	-7,4280	1,4468	3,2791	-4,4308	-1,4914	3,8172	0,921	0,928	0,42	0,40
Ольха**	<i>Pf</i>	-7,4051	1,3924	2,4827	-5,1805	-0,7736	2,8447	0,909	0,909	0,37	0,37
	<i>Pa</i>	-5,0977	2,3968	1,5236	-3,3182	0,5227	2,1676	0,960	0,994	0,25	0,09
	<i>Pst</i>	-4,8897	2,9380	0,9356	-3,5782	1,2025	1,7416	0,983	0,996	0,27	0,14
	<i>Pbr</i>	-5,3653	1,6865	2,4446	-2,3860	-2,2777	4,1539	0,931	0,958	0,62	0,49
	<i>Pf</i>	-4,3817	0,9144	1,8570	-2,1543	-2,0512	3,1237	0,903	0,930	0,51	0,43
Дуб**	<i>Pa</i>	-3,6444	2,2244	1,5306	-1,9734	-0,0097	2,4285	0,920	0,920	0,60	0,60
	<i>Pst</i>	-7,0424	3,6349	0,9830	-3,4630	0,9143	2,0178	0,981	0,998	0,28	0,09
	<i>Pbr</i>	-8,3692	,9395	1,9533	-4,1988	-0,4831	3,0181	0,948	0,955	0,53	0,50
	<i>Pf</i>	-6,0540	1,7314	1,4092	-0,3418	-2,5603	3,0884	0,890	0,963	0,52	0,30
	<i>Pa</i>	-6,6188	3,4798	1,1162	-2,8717	0,6046	2,1842	0,980	0,998	0,28	0,08
Бук	<i>Pr</i>	-9,4846	4,0811	0,5825	-2,3883	-0,8150	2,8319	0,873	0,987	0,45	0,15

Продолжение таблицы 3

Род (вид)	Фракция фитомассы	Константы уравнения (7)			Константы уравнения (8)			R^2 для уравнений		SE для уравнений*	
		a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2	(7)	(8)	(7)	(8)
Ясень	<i>Pst</i>	-5,5052	3,2511	0,6154	-3,4031	0,9774	1,8969	0,951	0,993	0,37	0,14
	<i>Pbr</i>	-8,8510	3,3211	1,4418	-5,7736	0,2357	2,8483	0,911	0,952	0,61	0,45
	<i>Pf</i>	-5,9419	2,2613	0,3642	-3,7172	-0,2742	1,9697	0,737	0,826	0,67	0,55
	<i>Pa</i>	-5,1055	3,1186	0,7713	-2,9158	0,8088	1,9931	0,948	0,990	0,38	0,17
	<i>Pr</i>	-6,4246	2,4717	1,6552	-3,7186	0,7230	1,7707	0,974	0,951	0,18	0,25
Робиния псевдоакация	<i>Pst</i>	-6,0674	3,5274	0,2219	-4,0203	1,3945	1,6113	0,986	0,997	0,26	0,13
	<i>Pbr</i>	-8,7106	3,4521	1,0172	-5,3541	0,0784	2,8013	0,952	0,959	0,55	0,51
	<i>Pf</i>	-6,2924	2,1115	0,7108	-3,0734	-1,1741	2,6220	0,909	0,944	0,48	0,38
	<i>Pa</i>	-5,8507	3,4556	0,3645	-3,5336	1,0627	1,8515	0,984	0,996	0,28	0,14
	<i>Pr</i>	-6,1719	3,0281	0,3662	-4,1722	0,9728	1,6105	0,973	0,983	0,33	0,26
Ива**	<i>Pst</i>	-3,5616	1,6770	1,9024	-4,1950	1,3580	1,6113	0,990	0,995	0,21	0,13
	<i>Pbr</i>	0,1060	-1,8624	4,6239	-3,4979	-1,0773	3,1376	0,982	0,846	0,30	0,85
	<i>Pf</i>	-0,3589	-1,4312	3,2192	-2,7032	-1,0801	2,2967	0,964	0,774	0,29	0,72
	<i>Pa</i>	-1,6450	0,6277	2,6254	-3,0553	0,6430	1,9808	0,993	0,993	0,17	0,15
	<i>Pst</i>	-6,9681	3,8389	0,5222	-3,1350	0,7518	2,0143	0,940	0,980	0,30	0,18
Клён**	<i>Pbr</i>	-7,7613	2,5504	2,0788	-2,5050	-1,4429	3,4399	0,938	0,926	0,36	0,39
	<i>Pf</i>	-7,4901	2,1207	1,4187	-3,8551	-0,6443	2,3695	0,941	0,933	0,26	0,28
	<i>Pa</i>	-6,6197	3,6755	0,7345	-2,4794	0,3710	2,2604	0,950	0,991	0,28	0,12
	<i>Pst</i>	-5,2602	2,7644	1,2447	-3,5246	1,0983	1,7758	0,952	0,987	0,33	0,17
	<i>Pbr</i>	-7,0314	2,1650	2,4414	-4,1727	0,4877	2,1442	0,974	0,947	0,24	0,34
Ильм**	<i>Pf</i>	-6,7861	1,8773	1,4925	-5,5365	2,3035	0,0889	0,966	0,887	0,21	0,39
	<i>Pa</i>	-4,8141	2,6275	1,4102	-2,9604	1,0683	1,7356	0,963	0,987	0,28	0,17
	<i>Pst</i>	-4,8445	2,7262	0,9158	-4,4928	1,4131	1,6960	0,946	0,996	0,24	0,09
	<i>Pbr</i>	-2,4186	0,0966	2,8060	-0,5952	-3,2605	4,3129	0,974	0,891	0,50	0,54
	<i>Pf</i>	-3,0746	0,3445	1,9535	-2,5934	-1,7183	2,9793	0,989	0,944	0,26	0,30
Чозения**	<i>Pa</i>	-4,2335	2,4191	1,2034	-3,3965	0,7574	2,0369	0,943	0,998	0,25	0,07

Продолжение таблицы 3

Род (вид)	Фракция фитомассы	Константы уравнения (7)			Константы уравнения (8)			R^2 для уравнений		SE для уравнений*	
		a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2	(7)	(8)	(7)	(8)
Боярышник**	<i>Pst</i>	-1,2292	-0,4783	2,8221	-2,0545	0,4938	1,1043	0,890	0,987	0,18	0,13
	<i>Pbr</i>	-8,7548	3,7923	4,2467	-1,4592	-1,6520	3,0043	0,878	0,909	0,53	0,51
	<i>Pf</i>	-4,8641	0,0136	4,8245	-2,0072	-1,7531	2,5305	0,850	0,980	0,41	0,17
	<i>Pa</i>	-2,7379	0,6191	3,7607	-0,8835	-0,4459	1,8918	0,908	0,994	0,27	0,10
Черёмуха**	<i>Pst</i>	-3,4531	1,1458	2,8662	-5,0460	3,2890	0,5714	0,997	0,989	0,10	0,19
	<i>Pbr</i>	-3,1006	-0,1337	4,0271	-0,1911	-2,4202	2,6795	0,931	0,995	0,56	0,14
	<i>Pf</i>	-4,4110	1,2171	1,7441	-4,0550	1,0991	0,8809	0,974	0,997	0,22	0,07
	<i>Pa</i>	-2,7375	1,0709	2,8082	-2,6197	1,4371	1,1765	0,987	0,996	0,21	0,12
Орех маньчжурский**	<i>Pst</i>	-10,6826	3,0941	3,2584	-3,8442	0,9762	2,0147	0,947	0,996	0,38	0,11
	<i>Pbr</i>	-10,5211	1,7032	4,2788	-3,5582	0,5692	1,7373	0,969	0,949	0,24	0,31
	<i>Pf</i>	-7,9702	0,9044	3,4339	-2,4775	0,0720	1,3514	0,981	0,945	0,13	0,22
	<i>Pa</i>	-9,8508	2,7308	3,4642	-2,9247	0,7603	1,9869	0,954	0,997	0,34	0,08
Маакия амурская**	<i>Pst</i>	-4,3112	0,6069	3,8326	-1,3446	0,0631	1,9938	0,920	0,972	0,41	0,24
	<i>Pbr</i>	-3,9659	-0,4487	4,5136	-0,9784	-0,6933	2,1472	0,904	0,917	0,43	0,40
	<i>Pf</i>	-2,9007	-0,7695	3,3428	-0,4107	-1,1676	1,7003	0,903	0,978	0,29	0,14
	<i>Pa</i>	-3,4548	0,3118	3,9561	-0,5073	-0,1598	2,0125	0,917	0,963	0,40	0,27
Бархат амурский**	<i>Pst</i>	-6,4711	2,6980	1,7243	-2,8523	0,7836	1,7956	0,947	0,992	0,39	0,15
	<i>Pbr</i>	-8,6881	1,1436	4,2409	-1,2428	-1,8452	3,2566	0,935	0,993	0,42	0,14
	<i>Pf</i>	-1,5768	0,2913	0,9945	-0,0339	-0,1695	0,6018	0,943	0,901	0,09	0,12
	<i>Pa</i>	-5,8167	2,3121	2,0624	-1,7361	0,3150	1,9503	0,946	0,995	0,37	0,11

* SE – стандартная ошибка уравнения.

** Данные о массе корней отсутствуют.

Таблица 4

Средние значения R^2 и SE , характеризующие уравнения (7) и (8) для фракций фитомассы Pi лиственных пород, и значимость их различия по уравнениям (7) и (8)

Фракция фито- массы	Показа- тель	Уравне- ние	M	$\pm m$	Значимость разли- чия по Стьюденту		n	Наличие или отсутствие различия
					$t_{\text{факт}}$	$t_{\text{табл}}$		
Pst	R^2	(7)	0,952	0,0076	5,02	3,46	17	Есть
		(8)	0,990	0,0017				
	SE	(7)	0,30	0,0224	6,23	3,46	17	Есть
		(8)	0,14	0,0112				
Pbr	R^2	(7)	0,914	0,0183	1,03	3,46	17	Нет
		(8)	0,935	0,0091				
	SE	(7)	0,49	0,0362	1,20	3,46	17	Нет
		(8)	0,43	0,0390				
Pf	R^2	(7)	0,888	0,0245	0,67	3,46	17	Нет
		(8)	0,905	0,0197				
	SE	(7)	0,39	0,0459	0,75	3,46	17	Нет
		(8)	0,34	0,0439				
Pa	R^2	(7)	0,946	0,0078	4,40	3,46	17	Есть
		(8)	0,986	0,0046				
	SE	(7)	0,33	0,0261	4,08	3,46	17	Есть
		(8)	0,17	0,0305				
Pr	R^2	(7)	0,910	0,0380	1,67	Мало данных		
		(8)	0,975	0,0082				
	SE	(7)	0,36	0,1213	1,53	Мало данных		
		(8)	0,18	0,0250				
В сред- нем	R^2	(7)	0,924	0,0083	3,04	3,09	72	Нет
		(8)	0,956	0,0065				
	SE	(7)	0,38	0,0185	4,08	3,09	72	Есть
		(8)	0,27	0,0208				

Заключение

Впервые для лиственных древесных и кустарниковых пород, произрастающих в лесах Евразии, сформирована база данных о фитомассе деревьев в количестве 1337 определений. Примерно четвертая её часть, имеющая данные измерений диаметра крон деревьев, использована нами для сравнительного анализа объяснительной способности аллометрических моделей, предназначенных для подеревной оценки структуры фитомассы лазерно-локационным методом с использованием двух наиболее информативных морфометрических показателей деревьев – высоты и диаметра кроны, и традиционных аллометрических моделей, предназначенных для наземной таксации фитомассы с использованием таких морфометрических показателей, как высота дерева и диаметр ствола на высоте груди.

Впервые разработана система аллометрических моделей для дистанционной оценки структуры фитомассы лиственных деревьев и кустарников в лесах Евразии лазерно-локационным методом. Установлено, что оценка фитомассы листвы и ветвей деревьев по двум упомянутым моделям выполняется примерно с одинаковой точностью, но масса ствола и надземная по второй модели оценивается на 4% точнее, чем по первой. Однако эта более низкая объяснительная способность первой модели по отношению ко второй компенсируется преимуществом дистанционной локации – несопоставимой с наземной таксацией скоростью обработки данных в режиме реального време-

ни. Это даёт возможность оценивать изменение углеродного пула лесных фитоценозов на той или иной территории в ходе её периодических облётов.

Предложенная информация может быть полезна при осуществлении мероприятий по стабилизации климата, а также при валидации результатов имитационных экспериментов по оценке углерододепонирующей способности лесов.

Список использованной литературы

Алексеев В.И., Уткин А.И. Таблицы массы фракций деревьев главнейших лесообразующих пород: сосны, ели, берёзы и осины // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М.: Наука, 1982. С. 237-240, 255-280.

Вейсов С., Каплин В.Г. К методике определения надземной фитомассы белого саксаула в Восточных Каракумах // Проблемы освоения пустынь. 1976. № 1. С. 60-64.

Данилин И.М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Красноярск: СибГТУ, 2003. 35 с.

Данилин И.М., Медведев Е.М., Мельников С.Р. Лазерная локация Земли и леса: Учебное пособие. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 2005. 182 с.

Кричун В.М., Усольцев В.А., Внучков В.Т. Сортиментные таблицы осинников Северного Казахстана // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1978. № 10. С. 102-106.

Крюденер А. Массовые таблицы и таблицы сбega для березы в удельных лесах средней России по данным работ 1904-1907 г.г. с кратким описанием типов насаждений, послуживших материалом к ним. Вып. 1. СПб., 1908. Ч. 1. 52 с. Ч. 2. 66 с., приложение, 26 с.

Лежнин С.А., Незамаев С.А., Новокишова Е.В., Комарова И.В. Оценка фитомассы молодняков березы Заволжской песчаной низменности по спутниковым снимкам // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: Матер. междунар. конф. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. С. 168 -173.

Орлов М.М. Лесная вспомогательная книжка для таксации и технических расчетов. М.: Государственное техническое изд-во, 1928. 757 с.

Токмурзин Т.Х., Байзаков С.Б. Рекомендации по таксации надземной массы и освоению древесной зелени сосновых и еловых лесов Казахстана. Алма-Ата: КазСХИ, 1970. 63 с.

Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г. Справочник таксатора. Таблицы для таксации леса. М.-Л.: Гослесбуиздат, 1952. 853 с.

Тюрин А.В., Науменко И.М., Воропанов П.В. Лесная вспомогательная книжка. М.: Гослестехиздат, 1945. 405 с.

Усольцев В.А. Таблицы для подеревного учета надземной фитомассы березы и осины Северного Казахстана // Рациональное использование и повышение устойчивости лесов Казахстана. Щучинск Кокчетавской обл., 1983. С. 143-164 (Рукопись депонирована в КазНИИНТИ 7 июля 1983 г., № 478 Ка-Д 83. Реферат опубликован в Библиографическом указателе ВИНТИ «Депонированные научные работы». М., 1983. № 12 (146). С. 157-158).

Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>).

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, 1988. 253 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352>).

Усольцев В.А. Перспективы 3D-моделирования пространственной структуры фитомассы лесов // Эко-Потенциал (Екатеринбург). 2014. № 2(6). С. 55-71 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3179>).

Усольцев В.А., Гаврилин Д.С., Субботин К.С. Фитомасса деревьев лиственницы на северном и южном пределах и составление справочно-нормативных таблиц // Эко-Потенциал. 2015. № 2(10). С. 7-16 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/4305>).

Усольцев В.А., Усольцева Р.Ф. Аппроксимирование надземной фитомассы берёзы и осины по диаметру и высоте ствола // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1977. № 7. С. 83-89.

Уткин А.И. Лесная наука и исследования по Международной Биологической Программе (МБП) // Растительные ресурсы. 1967. Т. 3. № 4. С. 490-504.

Синицын С.Г., Сухих В.И. Использование материалов многозональных и космических съёмок в интересах лесного хозяйства // Аэрокосмические исследования Земли. М.: Наука, 1979. С. 86-101.

Brandtberg T., Warner T.A., Landenberger R.E., McGraw J.B. Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2007. Vol. 61. Issue 5. P. 325-340 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271606001274>).

Burger H. Der Kronenaufbau gleichalteriger Nadelholzbestände // Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen. 1939. Bd. XXI. H. 1. S. 5-57 (Sonderabdruck).

Dalponte M., Reyes F., Kandare K., Gianelle D. Delineation of individual tree crowns from ALS and hyperspectral data: a comparison among four methods // European Journal of Remote Sensing. 2015. Vol. 48. P. 365-382 (doi: 10.5721/EuJRS20154821).

Dengler A. Kronengrösse, Nadelmenge und Zuwachsleistung von Altkiefern // Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen. 1937. Jahrgang 69. S. 321-336.

Dobrowski S.Z., Swanson A.K., Abatzoglou J.T., Holden Z.A., Safford H.D., Schwartz M.K., Gavin D.G. Forest structure and species traits mediate projected recruitment declines in western US tree species // Global Ecology and Biogeography. 2015. Vol. 24. No. 8. P. 917-927.

Hartig R. Wachstumsuntersuchungen an Fichten // Forstlich-Naturwissenschaftliche Zeitschrift. 1896. Jahrgang 5. Heft 1, 3. S. 1-15, 33-45.

Holmgren J., Persson Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanning // Remote Sens. Environ. 2004. Vol. 90. P. 415-423.

Hosoda K., Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan // J. For. Res. 2010. Vol. 15. No. 5. P. 299-306 (DOI 10.1007/s10310-010-0192-y).

Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species // USDA Forest Service. Northeastern Research Station. General Technical Report NE-319, 2004. 45 pp.

Jucker T., Caspersen J., Antin C. et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programs // Ecology Letters. 2016. (in preparation).

Kajihara M. Crown structure of sugi (*Cryptomeria japonica*) and the relationship between crown dimensions and leaf fresh weight // Bull. of Kyoto Prefectural University Forests. 1980. Vol. 24. P. 49-63.

Kajihara M. Crown form, crown structure and the relationship between crown dimensions and leaf fresh weight of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) // Bull. of Kyoto Prefectural University Forests. 1981. Vol. 25. P. 11-28.

Kern K.G. Die Beziehungen zwischen einigen Kronenkennwerten und dem Nadel-trockengewicht bei Fichte und Tanne // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 1962. Jahrgang 133. S. 13 -18.

Lim K.S., Treitz P.M. Estimation of aboveground biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators // *Scand. J. For. Res.* 2004. Vol. 19. No. 6. P. 558-570.

Liu Z., Ma Q., Pan X. A study on the biomass and productivity of the natural *Larix gmelinii* forests // *Acta Phytocologica Sinica*. 1994. Vol. 18. No. 4. P. 328-337 (In Chinese with English abstracts).

Maltamo M., Eerikäinen K., Pitkänen J. et al. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions // *Remote Sens. Environ.* 2004. Vol. 90. No. 3. P. 319-330.

Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum // *Silva Fennica*. 2006. Vol. 40. No. 4. P. 763-773.

Nadkarni N.M., Parker G. Creation of the Canopy Research Network // *Ecological Modelling*. 1994. Vol. 71. P. 289.

Næsset E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 80. No. 1. P. 88-99.

Næsset E., Gobakken T., Holmgren J., Hyypä H. et al. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 19. P. 482-489.

Nelson R.F., Swift R.N., Krabill W.B. Using airborne lasers to estimate forest canopy and stand characteristics // *Journal of Forestry*. 1988. Vol. 86. No. 10. P. 31-38.

Ohmann L.F., Grigal D.F., Brander R.B. Biomass estimation for five shrubs from northeastern Minnesota // *USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Research paper NC-133*, 1976. 11 pp.

Päivinen R., Lehtikainen M., Schuck A., Häme T., Väättäinen S., Kennedy P., Folving S. Combining earth observation data and forest statistics. European Forest Institute and JRC: Italy, 2001. 101 pp.

Popescu S.C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar // *Biomass and Bioenergy*. 2007. Vol. 31. Issue 9. P. 646-655 (doi:10.1016/j.biombioe.2007.06.022).

Sheridan R.D., Popescu S.C., Gatzolis D., Morgan C.L.S., Ku N.-W. Modeling forest aboveground biomass and volume using airborne LiDAR metrics and forest inventory and analysis data in the Pacific Northwest // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. No 1. P. 229-255 (doi:10.3390/rs7010229).

Stone C., Penman T., Turner R. Determining an optimal model for processing lidar data at the plot level: results for a *Pinus radiata* plantation in New South Wales, Australia // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 2012. Vol. 42. P. 191-205 (<http://www.scionresearch.com/general/publications/nzjfs>).

Weaver T. Area-mass relationships for common Montana shrubs // *Proc. Mont. Acad. Sci.* 1977. Vol. 37. P. 54-58.

Westman W.E., Whittaker R.H. The pygmy forest region of Northern California: studies on biomass and primary productivity // *The Journal of Ecology*. 1975. Vol. 63. P. 493-520.

Zheng D., Heath L.S., Ducey M.J. Forest biomass estimated from MODIS and FIA data in the Lake States: MN, WI, and MI, USA // *Forestry*. 2007. Vol. 80. P. 265-278.

Рецензент статьи: профессор Уральского государственного лесотехнического университета, доктор с.-х. наук В.А. Азарёнок.